

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **177 832** (13) U1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[H04B 1/10 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 27.02.2019)
Пошлина: учтена за 2 год с 25.10.2017 по 24.10.2018

(21)(22) Заявка: [2016141711](#), 24.10.2016(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.10.2016Дата регистрации:
14.03.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 24.10.2016(45) Опубликовано: [14.03.2018](#) Бюл. № 8

Адрес для переписки:
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,
УРФУ, Центр интеллектуальной
собственности, Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

Язовский Александр Афонасьевич (RU),
Милащенко Егор Александрович (RU),
Щепочкин Игорь Николаевич (RU),
Щепочкина Юлия Александровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ПОДАВЛЕНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

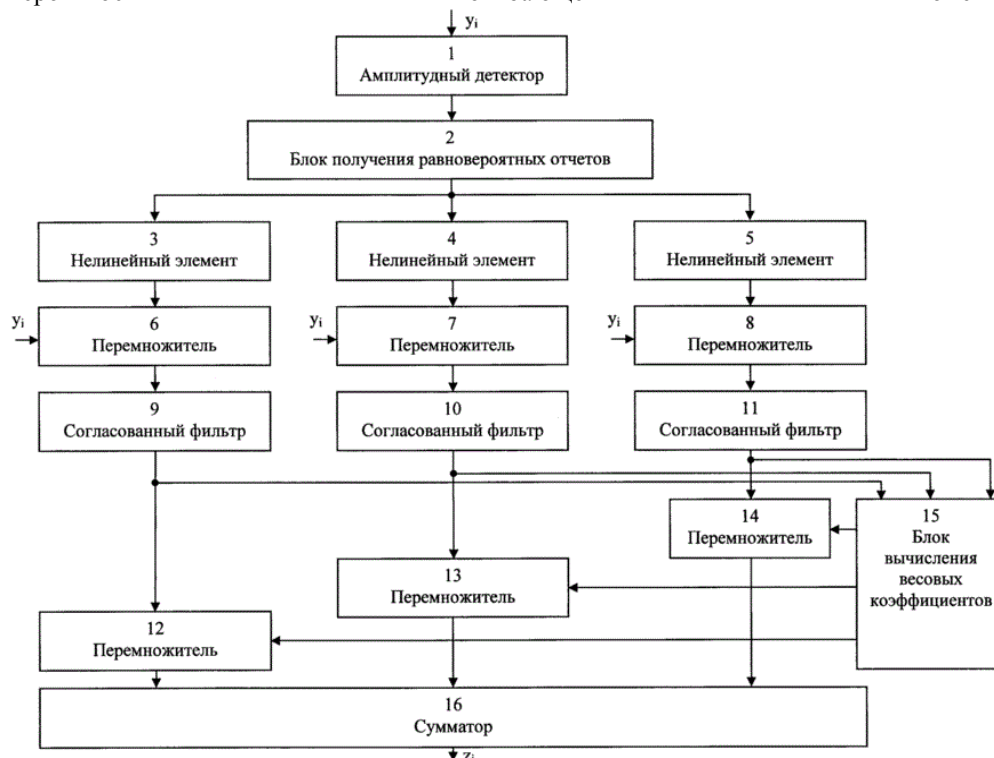
(57) Реферат:

Устройство относится к области радиоэлектроники и может быть использовано в радиоприемных устройствах, работающих в условиях узкополосных помех. Техническая задача, на решение которой направлено заявляемое устройство, состоит в обеспечении подавления узкополосных помех вне зависимости от плотности распределения вероятности амплитуды помехи и исключение подавления полезного сигнала на выходе устройства при воздействии помех малой мощности или полном отсутствии помех. Решение данной задачи достигается тем, что устройство содержит амплитудный детектор, на вход которого поступает смесь полезного сигнала и помехи, блок получения равновероятных отчетов, Q нелинейных элементов, $2Q$ перемножителей, Q согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом выход амплитудного детектора соединен с входом блока получения равновероятных отчетов, выход которого соединен с входом каждого нелинейного элемента, выход каждого нелинейного элемента соединен с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с входом амплитудного детектора, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра, выход которого соединен с соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов, а также с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с соответствующим выходом блока вычисления весовых коэффициентов, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора, на выходе которого получаем полезный сигнал со значительно подавленной помехой. Благодаря блоку получения равновероятных отчетов, а также представлению совокупности амплитудных характеристик нелинейных элементов в виде многочлена Лежандра порядка Q , устройство является нечувствительным к виду распределения помехи и ее мощности, что в итоге дает стабилизацию порога обнаружения и стабильную вероятность ложной тревоги. Таким образом, требуется один раз рассчитать порог правильного обнаружения, исходя из нужного значения ложной тревоги, и она будет постоянна при любых изменениях плотности

вероятности

оглибающей

помехи.



Фиг. 1

Устройство подавления узкополосных помех относится к области радиоэлектроники и может быть использовано в радиоприемных устройствах, работающих в условиях узкополосных помех.

Известны устройства подавления узкополосных помех, представленные в [1-3].

Основным недостатком рассмотренных устройств является то, что они не позволяют добиться максимальной эффективности подавления помех, поскольку не являются адаптивными относительно плотности распределения амплитуды помех.

Наиболее близким аналогом (прототипом) по технической сущности и принципу действия является устройство подавления узкополосных помех, описанное в [2, стр. 300, рис. 5.12a]. Это устройство содержит последовательно включенные амплитудный детектор, нелинейный элемент, первый умножитель, второй вход которого соединен с выходом полосового ограничителя, вход которого соединен с входом амплитудного детектора. Выход первого умножителя является выходом устройства нелинейного подавления помех, где получаем полезный сигнал с частично подавленной помехой.

Технический результат работы прототипа заключается в обнаружении сигналов на фоне узкополосных помех при нелинейной обработке огибающей входной смеси полезного сигнала и помехи.

К недостаткам прототипа следует отнести:

- устройство рассчитано на работу в условиях малого отношения сигнал/помеха, при большом отношении сигнал/помеха эффективность подавления сильно снижается, т.е. устройство реализует алгоритм подавления помехи, который не учитывает отсутствие на входе устройства помехи. При возникновении такой ситуации вместо помехи будет подавлен полезный сигнал;

- необходимо иметь априорную информацию о плотности распределения помехи, которая чаще всего неизвестна, или изменяется с течением времени, т.е. устройство не является адаптивным.

Таким образом, техническая задача, на решение которой направлено заявляемое устройство, состоит в том, чтобы создать устройство подавления узкополосных помех, которое является адаптивным относительно плотности распределения амплитуды помех, и эффективность которого не зависит от величины отношения сигнал/помеха.

Технический результат достигается тем, что устройство подавления узкополосных помех содержит (см. фиг. 1,) амплитудный детектор, блок получения равновероятных отчетов, $2 \cdot Q$ нелинейных элементов, $2 \cdot Q$ перемножителей, Q согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом выход амплитудного детектора 1 соединен с входом блока получения равновероятных отчетов 2, выход которого соединен с входом каждого нелинейного элемента 3, 4, 5, выход каждого нелинейного элемента 3, 4, 5 соединен с первым входом соответствующего перемножителя 6, 7, 8, второй вход которого соединен с входом амплитудного детектора, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра 9, 10, 11, выход которого соединен с соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов 15, а также с первым входом соответствующего перемножителя 12, 13, 14, второй вход которого соединен с соответствующим

выходом блока вычисления весовых коэффициентов 15, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора 16.

Параметр Q может принимать любые положительные целые значения. На фиг. 1 представлена структурная схема устройства подавления узкополосных помех для случая Q=3.

Предлагаемое устройство выделяет огибающую входной смеси помехи и полезного сигнала, преобразовывает отсчеты огибающей к равновероятному закону распределения, делит полученный процесс на Q параллельных безынерционных нелинейных линейно-независимых каналов, подвергает согласованной с огибающей полезного сигнала фильтрации в каждом канале, а также суммирует согласованные отклики каждого канала с определенным весом, причем вектор весовых коэффициентов суммирования является собственным вектором, соответствующим максимальному собственному значению матрицы взаимных ковариаций согласованных откликов.

Предлагаемое устройство не использует ограничение о слабом по сравнению с помехой полезном сигнале на входе и не требует предположений относительно вероятностных характеристик помехи. Единственное ограничение - наличие согласованной фильтрации. В силу известного факта - ее инвариантности относительно амплитуды, фазы и времени прихода полезного сигнала на входе - следует аналогичная инвариантность предлагаемого устройства.

Таким образом, техническим результатом работы устройства является отсутствие необходимости иметь априорную информацию о плотности распределения помехи, а также отсутствие ограничения о слабом по сравнению с помехой полезном сигнале на входе.

Амплитудный детектор 1 может быть выполнен на полупроводниковых диодах, как указано в [4, стр. 123, рис. 7.1], или с применением операционных усилителей [5, стр. 109, рис. 5.10].

Остальные блоки устройства могут быть выполнены на микропроцессоре или сигнальном процессоре, у которого есть многоканальный АЦП, например, MultiClet R1 (см. руководство по эксплуатации) или TMS320F28335 (см. руководство по эксплуатации) с применением отдельного многоканального АЦП, например, AD7779 (см. руководство по эксплуатации).

Блок получения равновероятных отчетов 2 может быть реализован, например, с помощью метода ранжирования, что означает замену каждого, поступающего на его вход, отчета своим рангом, т.е. номером места в вариационном ряду. При этом, поскольку в качестве системы амплитудных характеристик нелинейных элементов необходимо использовать многочлен Лежандра порядка Q, аргумент которого лежит в диапазоне значений от -1 до 1, значения отчетов, поступающих на вход нелинейных элементов, т.е. рангов, также должны приводиться к этому диапазону. Таким образом, создаются условия для применения в качестве базисных функций нелинейных элементов ортонормированных многочленов Лежандра.

Блок определения весовых коэффициентов реализуется путем решения классической задачи поиска собственного вектора, который соответствует максимальному собственному значению матрицы взаимных ковариаций откликов согласованных фильтров [6, стр. 82].

Работу устройства можно описать следующим образом.

Любой узкополосный процесс $y(t)$ можно представить в виде:

$$y(t) = \dot{A}(t)e^{j\omega_0 t}, \quad (1)$$

где

$\dot{A}(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$ - комплексная огибающая процесса $y(t)$, которая содержит

огибающую $A(t)$ и фазу $\phi(t)$.

Любое безынерционное нелинейное преобразование $f[y(t)]$ изменяет только огибающую $A(t)$ процесса $y(t)$:

$$f[y(t)] = f[A(t)e^{j\omega_0 t} e^{j\phi(t)}] = u[A(t)]e^{j\omega_0 t} e^{j\phi(t)} = \frac{u[A(t)]}{A(t)} y(t), \quad (2)$$

где

$u[A(t)]$ - амплитудная характеристика нелинейного преобразователя по первой гармонике частоты ω_0 .

Представим амплитудную характеристику нелинейного преобразователя по первой гармонике обобщенным полиномом

$$u[A(t)] = h v[A(t)], \quad (3)$$

где

$h = \{h_1, h_2, \dots, h_Q\}^T$ - вектор столбец параметров настройки нелинейного

преобразователя, $v[A(t)] = \{v_1[A(t)], v_2[A(t)], \dots, v_Q[A(t)]\}^T$ - система линейно-независимых базисных функций.

Тогда

$$f[y(t)] = \frac{h^T v[A(t)]}{A(t)} y(t). \quad (4)$$

Заменим непрерывные функции времени совокупностью их дискретных отчетов в моменты времени $t_i = i\Delta t$, тогда $y(t_i) = y_i$, $A(t_i) = A_i$, $\phi(t_i) = \phi_i$ где $i \in [1 \dots N]$ - целое число, количество отчетов сигнала.

Отчеты процессов на выходах базисных функций можно объединить в прямоугольной $N \times Q$ матрице D с элементами

$$d_{i,k} = \frac{v_k(A_i)}{A_i} y_i.$$

Если матрицу D с элементами $d_{i,k}$ представить совокупностью векторов $D = \{d^{(1)}, d^{(2)} \dots d^{(Q)}\}$, то совокупность отчетов на выходе нелинейного преобразователя $f = \{f(y_1), f(y_2) \dots f(y_N)\}^T$ можно представить в виде $f = Dh$, а энергию на его выходе, равную энергии на входе СФ

$$E_{\text{ex}} = f^T \bar{f}. \quad (5)$$

Примем, что согласованный фильтр имеет комплексную импульсную характеристику $g(t_j) = g_j$, где $j \in [1 \dots M]$ - целое число, количество отчетов импульсной характеристики.

В силу линейности $u[A(t)]$ относительно параметров настройки h , отклик устройства подавления узкополосных помех $z(t_i) = z_i$ можно представить суммой откликов, полученных от каждой базисной функции $v_k(A_i)$

$$z_i = \sum_{j=0}^{M-1} f(y_{i-j}) g_j = \sum_{k=1}^Q h_k \sum_{j=0}^{M-1} \frac{v_k(A_{i-j})}{A_{i-j}} y_{i-j} \bar{g}_j = \sum_{k=1}^Q h_k \sum_{j=0}^{M-1} d_{i-j,k} \bar{g}_j. \quad (6)$$

Обозначим совокупность отчетов на выходах согласованных фильтров прямоугольной матрицей R с элементами

$$r_{i,k} = \sum_{j=0}^{M-1} \frac{v_k(A_{i-j})}{A_{i-j}} y_{i-j} \bar{g}_j = \sum_{j=0}^{M-1} d_{i-j,k} \bar{g}_j. \quad (7)$$

Тогда совокупность отчетов $Z = \{z_1, z_2 \dots z_M\}^T$ на выходе устройства подавления узкополосных помех может быть представлена в виде $Z = Rh$, а энергию на его выходе, т.е. на выходе СФ

$$E_{\text{вых}} = Z^T \bar{Z}. \quad (8)$$

Устройство должно адаптироваться к принимаемым помехам таким образом, чтобы обеспечить максимальное отношение энергии на выходе согласованного фильтра к энергии на его входе, если представить устройство простым эквивалентом вида нелинейный преобразователь плюс согласованный фильтр. Тогда энергия на входе согласованного фильтра есть энергия на выходе весовой суммы нелинейных преобразователей, амплитудные характеристики которых образуют систему ортонормированных функций. Таким образом, показатель эффективности K_E настройки нелинейного преобразователя, равен отношению энергии на выходе $E_{\text{вых}}$ и входе $E_{\text{вх}}$ согласованного фильтра, которые определяются выражениями:

$$E_{\text{вых}} = Z^T \bar{Z} = (Rh)^T \bar{Rh} = h^T R^T \bar{Rh}, \quad (9)$$

$$E_{\text{вх}} = f^T \bar{f} = (Dh)^T \bar{Dh} = D^T h^T \bar{Dh}. \quad (10)$$

Оптимальными значениями параметров настройки нелинейного преобразователя будем считать такие $h_{\text{опт}}$, при которых достигается максимум этого показателя.

Обозначим $A = R^T \bar{R}$, $B = D^T \bar{D}$, тогда показатель эффективности примет вид обобщенного отношения Релея:

$$K_E = \frac{h^T A h}{h^T B h} \leq \lambda_{\text{max}}. \quad (11)$$

Его максимизация эквивалентна поиску максимального собственного значения λ_{max} и соответствующего ему собственного вектора $h_{\text{опт}}$, которые являются решением уравнения

$$Ah = \lambda Bh. \quad (12)$$

В частности, если базисные функции $v(A)$ являются ортонормированными, а именно представляют собой многочлен Лежандра, то матрица B становится единичной и поиск оптимальных параметров $h_{\text{опт}}$ сводится к решению классической проблемы собственных значений.

Таким образом, применение блока получения равновероятных отчетов и использование многочлена Лежандра в качестве базисных функций делает устройство

нечувствительным к виду распределения помехи и ее мощности, что в итоге дает стабилизацию порога обнаружения и стабильную вероятность ложной тревоги. Следовательно, требуется один раз рассчитать порог правильного обнаружения, исходя из нужного значения ложной тревоги, и она будет постоянна при любых изменениях плотности вероятности огибающей помехи.

Для оценки эффективности устройства подавления узкополосных помех проведено математическое моделирование его работы в условиях следующих типов помех: гармонических и от взволнованной морской поверхности.

В таблице 1 приведены значения выигрыша μ для устройства подавления узкополосных помех и максимально возможного выигрыша μ_{\max} (значения в таблице даны в скобках) для условий гармонической помехи [2, стр. 301, рис. 5.13], при разном отношении «помеха/шум» α (базисные функции - многочлен Лежандра порядка m).

Таблица 1

α , дБ	m	
	1	4
	μ (μ_{\max}), дБ	μ (μ_{\max}), дБ
0	0 (0.5)	0 (0.5)

α , дБ	m	
	1	4
	μ (μ_{\max}), дБ	μ (μ_{\max}), дБ
10	8 (8)	8 (8)
20	18 (20)	18 (20)
30	27 (27)	27 (27)
40	37 (37)	37 (37)

В таблице 2 приведены значения выигрыша μ для устройства подавления узкополосных помех и максимально возможного выигрыша μ_{\max} (значения в таблице даны в скобках), рассчитанного по методике [7], для условий морской помехи с К-распределением плотности вероятности [8, стр. 113, формула 4.33], при разном отношении «помеха/шум» α (два варианта параметров помехи: $v=0.5$ и $b=0.5$, $v=1$ и $b=0.5$, базисные функции - многочлен Лежандра порядка m).

Таблица 2

$v=0.5$ и $b=0.5$		
α , дБ	m	
	1	4
	μ (μ_{\max}), дБ	μ (μ_{\max}), дБ
0	0 (0.8)	0 (1.1)
10	2.3 (4.5)	2.5 (4.5)
20	6.1 (8.4)	7.2 (8.9)
30	10.3 (11.3)	10.1 (12.7)
40	11.6 (13.6)	11.8 (15.5)
$v=1$ и $b=0.5$		
α , дБ	m	
	1	4
	μ (μ_{\max}), дБ	μ (μ_{\max}), дБ
0	0 (0.4)	0 (0.5)
10	1.7 (2.1)	1.9 (2.1)
20	2.1 (3.4)	2.3 (3.4)
30	2.9 (4)	3.1 (4.1)
40	3.5 (4.1)	3.6 (4.4)

По таблицам 1 и 2 можно сделать вывод, что эффективность предлагаемого устройства подавления узкополосных помех в основном незначительно (1-2 дБ) отличается от максимально возможной эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2360360 С1, МПК H04В 1/00, опубл. 27.06.2009.
2. П.А. Бакут. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с. Стр. 300, рис. 5.12а.
3. Патент РФ №2352063 С1, МПК H04В 1/10, опубл. 10.04.2009.
4. Радиоприемные устройства / Под ред. А.П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989. 342 с.
5. В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. К.: Техника, 1983. 213 с.
6. Ф.Р. Гантмахер. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
7. В.Г. Валеев, А.А. Язовский. Адаптивные нелинейные преобразователи для подавления негауссовских помех // Киевский политехнический институт. Изв. вузов

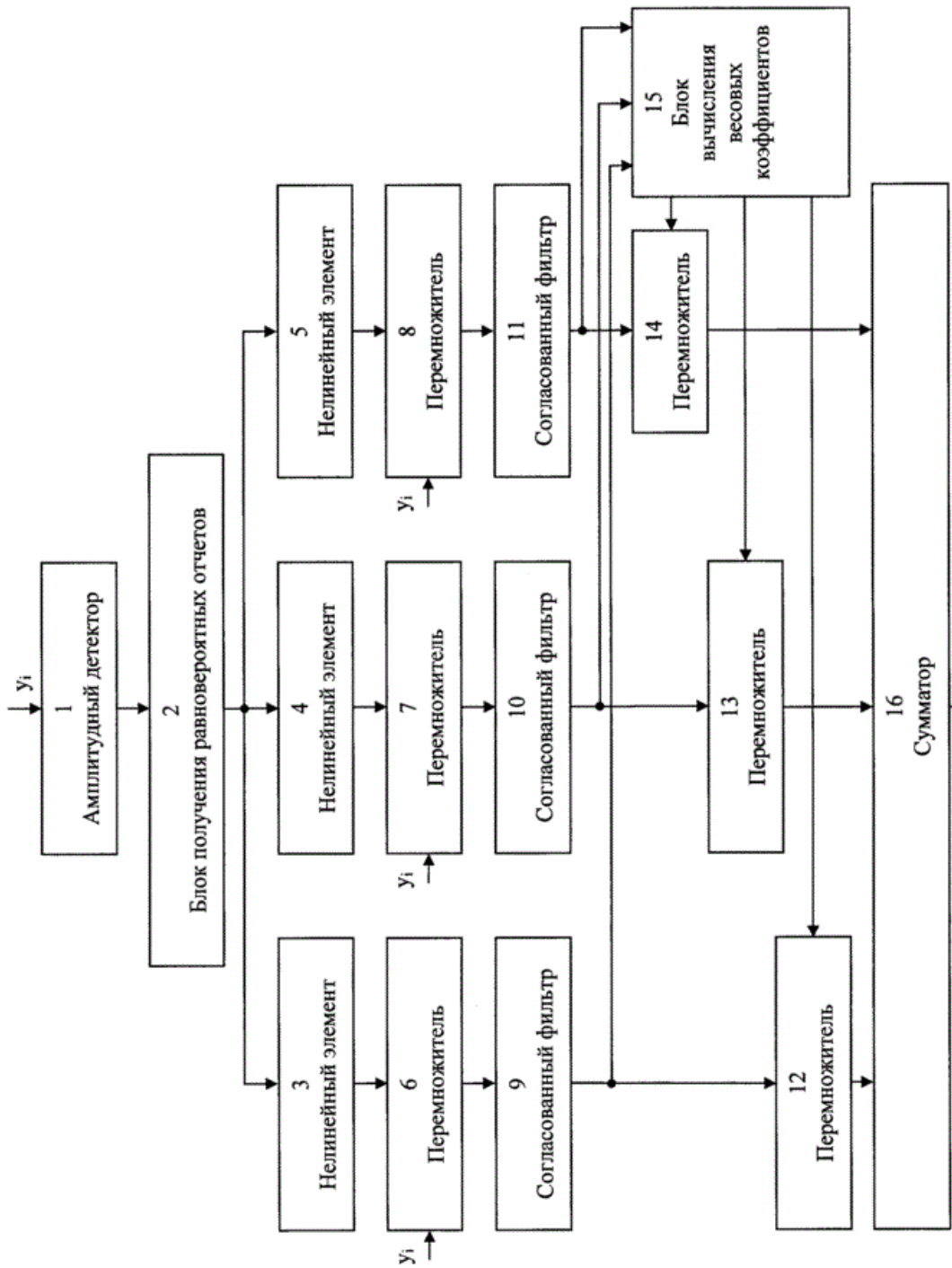
России. Радиоэлектроника. 1987. №8. Том 30. С. 62-64.

8. K. Ward, R. Tough, S. Watts. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. Croydon: CPI Group Ltd, 2006. 452 p.

Формула полезной модели

Устройство подавления узкополосных помех, содержащее амплитудный детектор, отличающееся тем, что в устройство введены блок получения равновероятных отсчетов, Q нелинейных элементов, амплитудные характеристики которых образуют систему линейно-независимых ортонормированных функций - многочленов Лежандра порядка $0, 1, \dots, Q-1, 2*Q$ перемножителей, Q согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом выход амплитудного детектора соединен с входом блока получения равновероятных отсчетов, выход которого соединен с входом каждого нелинейного элемента, выход каждого нелинейного элемента соединен с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с входом амплитудного детектора, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра, выход которого соединен с соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов, а также с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с соответствующим выходом блока вычисления весовых коэффициентов, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора.

Устройство подавления узкополосных помех



Фиг. 1